

**Л. Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П. А. КАПУСТЕНКО, А. Ю. ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО, С. И. БУХКАЛО,  
О. П. АРСЕНЬЕВА**

### **АНАЛИЗ ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМ АБСОРБЦИОННЫХ УСТАНОВОК ОЧИСТКИ СИНТЕЗ-ГАЗА ГАЗИФИКАЦИОННЫХ АГРЕГАТОВ БОЛЬШОЙ ЕДИНИЧНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ**

Рассмотрены основные сети теплообменников крупных газификационных установок с газификацией горючего топлива. Основными логистическими факторами, которые влияют на конфигурации технологических схем газификационных установок, являются характеристики качества и содержания компонентов топлива для газификации; диапазон целевых продуктов; экологическое законодательство и требования, включая выбросы парниковых газов; местоположение относительно крупных промышленных объектов, возможности конверсии отходов в товарную продукцию. Определены существующие системы абсорбционной очистки синтез-газа газификационных агрегатов большой единичной мощности и теплообменные компоненты этих систем. Описаны пути энергосберегающей реконструкции таких систем. Отмечена перспективность пластинчатых теплообменных аппаратов как теплообменных компонентов систем абсорбционной очистки.

**Ключевые слова:** абсорбционная очистка, синтез-газ, теплообменные позиции, пластинчатые теплообменники.

**Л. Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П. О. КАПУСТЕНКО, О. Ю. ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО, С. І. БУХКАЛО,  
О. П. АРСЕНЬЄВА**

### **АНАЛІЗ ТЕПЛООБМІННИХ СИСТЕМ АБСОРБЦІЙНИХ УСТАНОВОК ОЧИЩЕННЯ СИНТЕЗ- ГАЗУ ГАЗИФІКАЦІЙНИХ АГРЕГАТІВ ВЕЛИКОЇ ОДИНИЧНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ**

Розглянуто основні мережі теплообмінників великих газифікаційних установок з газифікацією горючого палива. Основними матеріально-технічними факторами, що впливають на конфігурацію технологічних схем газифікаційних установок, їх характеристики – вміст природного газу та компонентів газифікованого палива; асортимент цільових продуктів; екологічне законодавство та вимоги, включаючи вимоги до викидів парникових газів; розташування відносно великих промислових майданчиків; можливості перетворення відходів у продукти, що підлягають продажу. Визначено існуючі системи абсорбційної очистки синтез-газу газифікаційних агрегатів великої одиничної потужності та теплообмінні компоненти цих систем. Означені шляхи енергозберігаючої реконструкції таких систем. Відмічена перспективність пластинчатих теплообмінних апаратів як теплообмінних компонентів систем абсорбційної очистки.

**Ключові слова:** абсорбційна очистка, синтез-газ, теплообмінні позиції, пластинчасті теплообмінники.

**L. L. TOVAZHNYANSKYI, P. O. KAPUSTENKO, O. Y. PEREVERTAYLENKO, S. I. BUKHKALO,  
O. P. ARSENYEVA**

### **ANALYSIS OF HEAT EXCHANGERS NETWORKS FOR ABSORPTION CLEANING UNITS IN HIGH CAPACITY GASIFICATION PLANTS**

The basic heat exchangers networks of big gasification plants with fossil fuel gasification are considered. The main logistical factors that influence process flowsheets configurations of gasification plants are underlined such as natural quality and components content of fuel to be gasified, range of target products, environmental legislation and demands including regulations for greenhouse gases emission, location relatively to big industrial sites, possibilities of wastes conversion into saleable products. The essential ways of the efficiency enhancement of heat exchangers networks are formulated for integrated gasification plants of combined cycle. The existing systems of syngas absorption cleaning in big gasification plants are discussed. The ways of energy saving retrofit of such systems are defined. The use of plate heat exchangers is considered as perspective for heat transfer components of gases removal systems.

**Keywords:** acid components removal, syngas, heat transfer components, plate heat exchangers.

**Введение.** В настоящее время одной из основных задач современности является обеспечение устойчивого развития общества. Важный компонент решения этой задачи – сокращение расхода тепловой энергии и топлива [1]. Решение этой проблемы включает в себя множество аспектов, в том числе: экономия потребления энергоресурсов, развитие энергосберегающих технологий, использования вторичных энергетических ресурсов и т. д. [2–4]. В этой связи разработка энергосберегающих технологий приобретает первостепенное значение. Одной из таких технологий является газификация твердых и жидких горючих топлив.

Процесс газификации угля, углеводородов и углеродосодержащих отходов представляет собой совокупность химических реакций, в результате которых образуется газовая смесь, состоящая из оксида угле-

рода (CO), водорода и диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), которая называется синтез-газом [5]. Синтез-газ также содержит ряд примесей, образующихся за счет побочных химических реакций. В таблице 1 приведен состав продуктов, образующихся в результате сжигания углеродосодержащего сырья и его газификации [6]. Газификационные агрегаты конверсии отходов нефтеперерабатывающих производств так же, как и агрегаты газификации угля, представляют собой в той или иной степени интегрированную совокупность химико-технологических систем: разделение воздуха для получения кислорода, подаваемого в газогенератор (газификатор), собственно процесс газификации, системы очистки синтез-газа, включая очистку от H<sub>2</sub>S и CO<sub>2</sub>, очистку сточных вод.

В общем виде процесс газификации можно представить в виде функциональной схемы (рис. 1). Под-

готовленное к газификации сырье и газифицирующий агент поступают в газогенератор 3, в котором происходит процесс газификации. Сырой горячий синтез-газ охлаждается в котлах-утилизаторах или теплообменниках с выработкой пара с высокими параметрами. Кроме того, происходит очистка от механических примесей, а также HCN и HCL.

Таблица 1 – Сравнение продуктов сжигания и газификации углеродосодержащего сырья

Вид сырья	Сжигание	Газификация
Углеродосодержащие	CO <sub>2</sub>	CO, CO <sub>2</sub> , углеводороды
Водород	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>
Азот	NO, NO <sub>2</sub>	HCN, NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub>
Сера	SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> S, COS, CS <sub>2</sub>

Затем синтез-газ поступает в узел очистки от сернистых соединений и CO<sub>2</sub>. Улавливаемый сероводород может быть конвертирован в элементарную серу по известным технологиям. Очищенный синтез-газ может быть использован в газовых турбинах для выработки электроэнергии, как сырье для синтеза аммиака, метанола, топлива по методу Фишера-Тропша, водорода и некоторых продуктов органического синтеза.

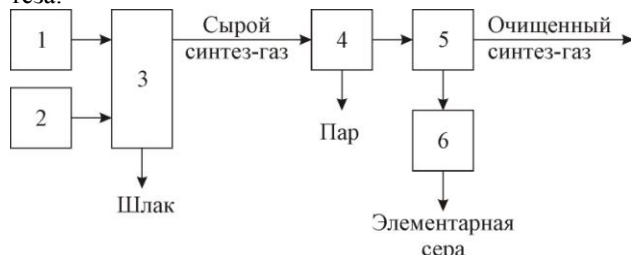


Рис. 1 – Принципиальная схема газификационной установки:

1 – подготовка газифицируемого сырья; 2 – підготовка газифицирующего агента; 3 – газификационный аппарат (газогенератор); 4 – узел охлаждения и очистки синтез-газа; 5 – узел очистки синтез-газа от H<sub>2</sub>S и CO<sub>2</sub>; 6 – установка получения элементарной серы

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими заданиями.** Целевым продуктом газификации является синтез-газ, состоящий из CO и H<sub>2</sub>, остальные продукты являются вредными примесями, которые снижают качество газа как сырья для дальнейших циклов химической конверсии, и подлежат удалению в процессе очистки.

мической конверсии, и подлежат удалению в процессе очистки.

В газификационных агрегатах большой единичной производительности удаление из синтез-газа H<sub>2</sub>S и CO<sub>2</sub> (кислых компонентов) производится путем абсорбционной очистки [7]. Абсорбционная очистка синтез-газа от кислых компонентов предусматривает циркуляцию жидкого поглотителя кислых газов (абсорбента) через абсорбер, где происходит собственно процесс поглощения кислых компонентов, а затем через регенератор абсорбента, где происходит десорбция кислых компонентов, то есть регенерация абсорбента, который снова направляется на абсорбцию. Регенерация производится, как правило, при сравнительно повышенных температурах (до 150°C) и требует подвода внешних теплоносителей, например, водяного пара. Процессы абсорбционной очистки газов можно классифицировать следующим образом:

Физические абсорбционные процессы, в которых извлечение кислых компонентов происходит только благодаря их растворимости в абсорбентах.

Хемосорбционные процессы, основанные преимущественно на химическом взаимодействии кислых компонентов с активной частью абсорбента.

Комбинированные процессы, использующие смеси физических и химических поглотителей.

В процессах абсорбционной очистки синтез-газа газификационных агрегатов большой единичной производительности применяются все три типа абсорбционной очистки.

**Обзор существующих абсорбционных систем очистки синтез-газа от кислых компонентов.** Анализ источников по существующим системам очистки синтез-газа от кислых компонентов [8–11] показал, что в настоящее время применяются все три вида процессов, перечисленных выше.

Из физических процессов применяются процессы Ректизол и Селексол, из химических процессов – очистка раствором метилдиэтанолamina (МДЭА) и АДП-процесс, из комбинированных – Сульфинол. Сравнительные характеристики процессов приведены в таблице 2 (ДЭПЭГ – диметилэтиловый эфир полиэтиленгликоля; ДИПА – диизопропанолamin; Т – температура; Р – давление; ВПН – водяной пар насыщенный).

Таблица 2. Основные характеристики процессов абсорбционной очистки синтез-газа от кислых компонентов

Процесс	Тип абсорбента	Состав абсорбента	Т абсорбента, °C	Р абсорбента, бар	Т регенерации, °C	Р регенерации, бар	Вид энергоносителя для регенерации абсорбента
Ректизол	Физический	Метанол	-20 ÷ -30	20 ÷ 100	~ 65	1–2	ВПН, 5бар
МДЭА	Хемосорбент	30–50 % водный раствор МДЭА	30 ÷ 50	до 70	115 ÷ 148	0,5 ÷ 1 (изб)	Водяной пар насыщенный
Селексол	Физический	ДЭПЭГ	до 35	35 ÷ 70	115 ÷ 120	0,5 изб	ВПН
АДП	Хемосорбент	30–40 % водный раствор ДИПА	30 ÷ 50	20 ÷ 40	~ 120	0,5 ÷ 1,5	Водяной пар насыщенный
Сульфинол	Комбинированный	45 % ИПА, 40 % СФ, 15 % вода	40	40	115 ÷ 125	0,5 ÷ 1,5	ВПН, 3,5бар

**Процесс Ректизол (Rectisol)** В данном процессе используется метанол ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) в качестве физического абсорбента. Процесс является одним из наиболее распространенных для очистки синтез-газа газификационных агрегатов, особенно при газификации углей с целью получения аммиака, метанола и топлив по методу Фишера-Тропша. Процесс абсорбции осуществляется при низких температурах и имеет две модификации [8, 11]:

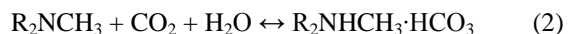
– одноступенчатый процесс, в ходе которого осуществляется абсорбция из синтез-газа  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CO}_2$ ;

– двухступенчатый процесс, когда извлечение  $\text{H}_2\text{S}$  осуществляется до процесса конверсии  $\text{CO}$ , а извлечение  $\text{CO}_2$  осуществляется после конверсии.

Процесс также предусматривает очистку синтез-газа от  $\text{COS}$ . Недостатками процесса является охлаждение синтез-газа, поступающего на абсорбер, до  $-20^\circ\text{C}$ , а также сложная теплообменная система установки очистки.

**Процесс Селексол (Selexol)** Процесс Селексол был разработан Allied Chemical Corporation в 1960-е годы. В качестве абсорбента используется диметилэфир полиэтиленгликоля для очистки синтез-газа, в основном, от  $\text{H}_2\text{S}$  при частичном поглощении других кислых компонентов, таких как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_3$  и меркаптаны. Низкая теплота абсорбции позволяет снизить энергозатраты на процесс. Процесс предполагает удаление  $\text{CO}_2$  путем промежуточной десорбции путем снижения давления. Процесс также предполагает абсорбцию углеводородов в количествах, пропорциональных их парциальным давлениям [9]. При использовании синтез-газа для получения аммиака поглощение  $\text{CO}_2$  осуществляется дополнительно раствором моноэтаноламина (МЭА) или метилдиэтаноламина, активированного пиперазином (аМДЭА).

**Процесс МДЭА-очистки** Хемосорбционный процесс МДЭА-очистки предусматривает применение раствора метилдиэтаноламина для поглощения кислых компонентов из синтез-газа. Концентрация МДЭА может достигать 30-50 %. МДЭА имеет более высокую селективность к  $\text{H}_2\text{S}$  в присутствии  $\text{CO}_2$ , чем первичные и вторичные амины. Поглощение  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CO}_2$  происходит по следующим реакциям [9]:



где  $\text{R} : \text{HOC}_2\text{H}_4$ .

Достигается поглощение 99 %  $\text{H}_2\text{S}$ , поглощение  $\text{CO}_2$  – в меньшей степени. Процесс применяется для очистки синтез-газа при газификации тяжелых нефтяных фракций и отходов нефтепереработки, включая нефтекокс.

Недостатком является более слабое поглощение  $\text{CO}_2$ , а также углеводородов ( $\text{C}_{3+}$ ), чем растворами дигликолямина и моноэтаноламина.

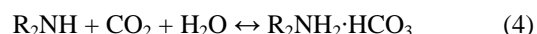
**АДИП (ADIP) процесс** Хемосорбционный процесс, в котором в качестве абсорбента применяется 30-40 % раствор диизопропаноламина ( $\text{HOC}_3\text{H}_7)_2\text{NH}$ .

Диизопропаноламин относится к вторичным аминам и обладает высокой селективностью к  $\text{H}_2\text{S}$  в присутствии  $\text{CO}_2$ .

При наличии в синтез-газе  $\text{COS}$  и  $\text{CS}_2$  не происходит деградация абсорбента. Нагрузка установки очистки по абсорбенту зависит от концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$  в исходном синтез-газе и требуемого содержания в нем  $\text{H}_2\text{S}$  после очистки. Недостатком является более слабое поглощение  $\text{CO}_2$ .

**Процесс Сульфинол (Sulfinol)** Процесс Сульфинол является комбинированным. Абсорбент представляет собой смесь физического абсорбента (тетрагидротиофен диоксида или Сульфолана) и хемосорбента – диизопропаноламина (ДИПА). Процесс Сульфинол используется для очистки синтез-газа от  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{COS}$ ,  $\text{CS}_2$ , меркаптанов и органических сульфидов и бисульфидов.

Процесс применяется для глубокой очистки газов от кислых компонентов и может быть использован как для газификации углей, так и для газификации тяжелых малоценных нефтепродуктов и отходов нефтепереработки. Поглощение  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$  ДИПА происходит по следующим реакциям [8]:



где  $\text{R} : (\text{HOC}_3\text{H}_7)_2\text{NH}$

Недостатком процесса является химическая деградация ДИПА в присутствии кислорода и  $\text{HCN}$ , а также при повышенных концентрациях  $\text{CO}_2$ . Деградации Сульфолана в производственных условиях не происходит.

**Структура теплообменных систем установок абсорбционной очистки синтез-газа.** Теплообменные системы установок абсорбционной очистки газов являются достаточно типовыми, за исключением процесса Ректизол, где в качестве абсорбента используется метанол, и процесс проходит при низких температурах. Теплообменная система процесса Ректизол достаточно подробно описана в [8]. Теплообменные системы процессов МДЭА – очистки, АДИП, Селексол и Сульфинол включают в себя рекуперативные теплообменники, охладители абсорбентов и кипяильники, подающие тепло на регенерацию абсорбентов. Типичная принципиальная схема вышеперечисленных процессов приведена на рис. 2. Теплообменная система (ТОС) установки абсорбционной очистки синтез-газа (рис. 2) состоит из рекуперативной части, охладителя и кипяильников абсорбента, а также охладителей кислых газов, удаляемых из установки. Охладители и кипяильники образуют утилитную часть ТОС [12]. Рекуперативная часть ТОС предназначена для подогрева насыщенного абсорбента теплом регенерированного абсорбента. Охлаждение регенерированного абсорбента до температуры абсорбции происходит в водяном охладителе. Охлаждение кислых газов, выделенных из десорбера при регенерации абсорбента производится также в



3. Perevertaylenko O.Y., Gariev A.O., Damartzis T., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Arsenyeva, O.P., 2015. Searches of cost effective ways for amine absorption unit design in CO<sub>2</sub> post-combustion capture process. *Energy*, 90, pp.105-112.
4. Bukhhalo, S.I., Klemeš, J.J., Tovazhnyanskyy, L.L., Arsenyeva, O.P., Kapustenko, P.O., Perevertaylenko, O.Y. Eco-friendly synergetic processes of municipal solid waste polymer utilization. *Chemical Engineering Transactions*, 2018, 70, 2047–2052.
5. Технологія зв'язаного азоту: Підручник. Товажнянський Л.Л., Лобойко О.Я. та ін.; за ред. Лобойко О.Я. Харків, НТУ «ХПІ», 2007, 536 с.
6. M. Ramezan. Coal based technologies. – NETL Gasification Technologies Training Course, Sept. 2004.
7. Товажнянський Л. Л., Капустенко П. А., Перевертайленко А. Ю., Бухкало С. И., Арсеньєва О. П. Анализ теплообменных систем установок газификации нефтеперерабатывающих производств. «Інтегровані технології та енергозбереження», 2011, № 3, с. 54–62
8. Handbook of Gasifies and Gas Treatment systems. DOE/ET, Sep.1982, part 2, 90 pp.
9. Gasification Database. Gasification Plant Report, NETL, US DoE, 2010, 191 pp.
10. China Gasification Database. NETL, US DoE Report, 2014.
11. Lurgi. The Rectosol Process. Lurgi Material № 308e/0.1.11/10, 2010, 12 pp.
12. Товажнянський Л. Л., Перевертайленко А. Ю., Арсеньєва О. П., Капустенко П. А., Арсеньєв П.Ю., Бочарников И. А. К вопросу энергосберегающей реконструкции теплообменных систем установок хемосорбционной очистки газов. «Інтегровані технології та енергозбереження», 2017, № 4, с. 3–5.
13. UOP Selexol™ Technology for Acid Gas Removal. Presentation UOP a Honeywell Company, 2009, 33pp.
14. J. Klemes, F. Friedler, I. Bulatov, P. Varbanov. Sustainability in the Process Industry. Integration and Optimization. The Mc Grow-Hill Co. Inc., New York, 2011.
1. Anipko O. B., Maljarenko V. A., Abramov Ju. A., Krivcova V. I., Kapustenko P. A. Osnovy jenergeticheskoy promyshlennosti. NTU «HPI», Har'kov, 2002, 436 s.
2. Kapustenko P. A., Kuzin A. K., Makarovskij E. L., Tovazhnyanskij L.L., Ul'ev L.M., Chernaja E.B.. Al'ternativnaja jenergetika i jenergosberezhenie: sovremennoe sostojanie i perspektivy. OOO Izdatel'skij dom «Vokrug cveta, Har'kov, 2004, 312 s.
3. Perevertaylenko O. Y., Gariev A. O., Damartzis T., Tovazhnyanskyy L. L., Kapustenko P. O., Arsenyeva O. P., 2015. Searches of cost effective ways for amine absorption unit design in CO<sub>2</sub> post-combustion capture process. *Energy*, 90, pp.105–112.
4. Bukhhalo S. I., Klemeš J. J., Tovazhnyanskyy L. L., Arsenyeva O. P., Kapustenko P. O., Perevertaylenko O. Y. Eco-friendly synergetic processes of municipal solid waste polymer utilization. *Chemical Engineering Transactions*, 2018, 70, 2047–2052.
5. Tehnologija zv'язanogo azotu: Pidruchnik. Tovazhnyanskij L.L., Lobjko O.Ja. ta in.; za red.. Lobjko O.Ja. – Harkiv, NTU «HPI», 2007, 536 s.
6. M. Ramezan. Coal based technologies. NETL Gasification Technologies Training Course, Sept. 2004.
7. Tovazhnyanskij L. L., Kapustenko P. A., Perevertajlenko A. Ju., Bukhhalo S. I., Arsen'eva O. P. Analiz teploobmennih sistem ustanovok gazifikacii neftepererabatyvajushih proizvodstv. «Інтегровані технології та енергозбереження», 2011, №3, s. 54–62
8. Handbook of Gasifies and Gas Treatment systems. – DOE/ET, Sep.1982, part 2, 90 pp.
9. Gasification Database. Gasification Plant Report, NETL, US DoE, 2010, 191 pp.
10. China Gasification Database. NETL, US DoE Report, 2014.
11. Lurgi. The Rectosol Process. Lurgi Material № 308e/0.1.11/10, 2010, 12 pp.
12. Tovazhnyanskij L. L., Perevertajlenko A. Ju., Arsen'eva O. P., Kapustenko P. A., Arsen'ev P. Ju., Bocharnikov I. A. K voprosu jenergosberegajushhej rekonstrukcii teploobmennih sistem ustanovok hemosorbcionnoj ochistki gazov. «Інтегровані технології та енергозбереження», 2017, №4, s. 3–5.
13. UOP Selexol™ Technology for Acid Gas Removal. Presentation UOP a Honeywell Company, 2009, 33pp.
14. J. Klemes, F. Friedler, I. Bulatov, P. Varbanov. Sustainability in the Process Industry. Integration and Optimization. The Mc Grow-Hill Co. Inc., New York, 2011.

#### References (transliterated)

Надійшла (received) 20.10.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Товажнянський Леонід Леонідович (Товажнянський Леонід Леонідович, Tovazhnyanskyy Leonid Leonidovich)** – доктор технічних наук, радник ректора, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002>; e-mail: [radnik@kharkov.ua](mailto:radnik@kharkov.ua)

**Капустенко Петро Алексеевич (Капустенко Петро Олексійович, Kapustenko Petro Oleksiyovich)** – кандидат технічних наук, професор кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3550-5274>; e-mail: [kap@kpi.kharkov.ua](mailto:kap@kpi.kharkov.ua)

**Перевертайленко Олександр Юрьевич (Перевертайленко Олександр Юрьевич, Perevertaylenko Oleksandr Yurievich)** – с.н.с. кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: [pvrt@ukr.net](mailto:pvrt@ukr.net)

**Бухкало Светлана Ивановна (Бухкало Світлана Іванівна, Bukhhalo Svetlana Ivanovna)** – доктор технічних наук, професор кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1389-6921>; e-mail: [bis.khr@gmail.com](mailto:bis.khr@gmail.com)

**Арсеньєва Ольга Петровна (Арсеньєва Ольга Петрівна, Arsenyeva Olga P. )** – кандидат технічних наук, професор кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9013-6451>; e-mail: [o.p.arsenyeva@gmail.com](mailto:o.p.arsenyeva@gmail.com)